

## 委員会報告 コンクリート材料ならびに関連規格の国際調査研究委員会

魚本健人\*1, 信田佳延\*2, 山田一夫\*3

**要旨:** コンクリート用材料は, 世界各所の地域性を反映し多様である。日本国内では一般的でも海外では特殊な場合もある。しかし, 海外の状況を国内の研究のみから知ることは困難である。そこで, 本研究委員会では, コンクリートおよびコンクリート材料を主とする建設材料に関する国際シンポジウム (ConMat'09) を主催し, 各国の最先端の技術について情報交換を行うとともに, 世界各国の主要な研究者の協力を得ながら, アンケート調査を実施し各地域で使用されているコンクリート材料の実際についてとりまとめた。

**キーワード:** ConMat'09, 国際調査, コンクリート材料, 規格, アンケート, 世界各国

### 1. はじめに

コンクリート用材料は, 世界各所の地域性を反映し, 多様である。日本国内では一般に使われている材料が海外では特殊な材料である場合もみられる。日本の技術をベースに海外で建設関連業務に当たる技術者は多いが, 海外での考え方の違いに直面する場合も多い。しかしながら, 海外の状況を, 国内における研究のみをもとに知ることは困難である。そこで, 本研究委員会では, コンクリートおよびコンクリート材料を主とする建設材料に関する国際シンポジウム (ConMat'09) を主催し, 各国の最先端の技術について情報交換を行うとともに, 世界各国の主要な研究者の協力を得ながら現実に各地域で使用されているコンクリート材料と規格の実際についてとりまとめる。さらに, ConMat'09 において, 研究委員会での取りまとめを報告し, かつ, 今後の材料の方向性について提言を行い, 本委員会の成果とする。

### 2. 委員会活動概要

本研究委員会では, 2つのワーキンググループ(WG)を構成し, 活動した。表-1に構成委員の一覧を示す。

- ConmMat'09企画WG(WG1): ConMat'09の開催計画および会議運営(主査: 信田委員)

- 国際調査 WG(WG2): コンクリート材料・技術および規格に関するアンケート調査の実施および ConMat'09での基調講演における調査結果の報告(主査: 山田委員)

#### 2.1 ConMat' 09 について (WG1)

建設材料に関する国際シンポジウム(ConMat)は, 建設材料に関する幅広い研究・適用成果を対象とする国際会議であり, 1997年にカナダ・オタワにて第1回が開催され, その後, 2001年に米国・サンノゼでの第2回, 2005年にカナダ・バンクーバーでの第3回が開催されている。主催を4年ごとに日本とカナダで交互に務めながら継続しており, 第1回会議では, A. Al-Manaseer 教授が, 第2回は, 長瀧重義教授が, 第3回は, N. Banthia 教授がそれぞれ議長を務められた。第4回目となる本会議 (ConMat'09, 魚本健人委員長が議長)は, 初めての日本での開催となり, 本研究委員会の WG1 では, 論文採択審査, 研究発表プログラムの立案, 技術展示, 見学会等の計画および会議の運営を行った。

表-1 構成委員一覧

委員長	魚本健人(芝浦工業大学)	委員	今本啓一(東京理科大学)
副委員長	畑中重光(三重大学) 六郷恵哲(岐阜大学)		太田晃(BASF ポゾリス(株)) 小林孝一(岐阜大学) 小澤満津雄((岐阜大学)
幹事長	信田佳延(鹿島建設(株), WG1 主査)		坂井悦郎(東京工業大学大学院) 堺孝司(香川大学) 西山峰広(京都大学)
幹事	山田一夫(太平洋セメント(株), WG2 主査) 綾野克紀(岡山大学) 入矢桂史郎((株)大林組) 大脇英司(大成建設(株)) 河井徹(清水建設(株)) 岸利治(東京大学生産技術研究所) 下村匠(長岡技術科学大学) 野口貴文(東京大学大学院) 久田真(東北大学大学院)		丸山一平(名古屋大学大学院) 芳村学(首都大学東京) 石川靖晃(名城大学) 河辺伸二(名古屋工業大学大学院) 国枝稔(名古屋大学大学院) 寺西浩司(名城大学)

\*1 芝浦工業大学 教授 工学博士 (正会員)

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 副所長 (正会員)

\*3 太平洋セメント(株)中央研究所 リーダー 博士(工学) (正会員)

表-2 アンケート送付国一覧

アジア	インド	南米	エルサルバドル	
	インドネシア		コスタリカ	
	韓国		コロンビア	
	シンガポール		パナマ	
	スリランカ		パラグアイ	
	タイ		ブラジル	
	中国		アフリカ	アルジェリア
	日本			ウガンダ
	ネパール			エジプト
	パキスタン			エチオピア
	バングラデシュ			ケニヤ
	フィリピン			ザンビア
	ベトナム			タンザニア
	マレーシア			チュニジア
	ラオス			南アフリカ
中東	イラン	欧州	イギリス	
	オマーン		イタリア	
	サウジアラビア		オランダ	
	ドバイ		コンボ	
	トルコ		スイス	
	バーレーン		スウェーデン	
オセアニア	オーストラリア		スペイン	
	ニュージーランド		スロバキア	
大洋州	パラオ		デンマーク	
北米	アメリカ		ドイツ	
	カナダ		ノルウェー	
	メキシコ		フランス	
			計	55ヶ国

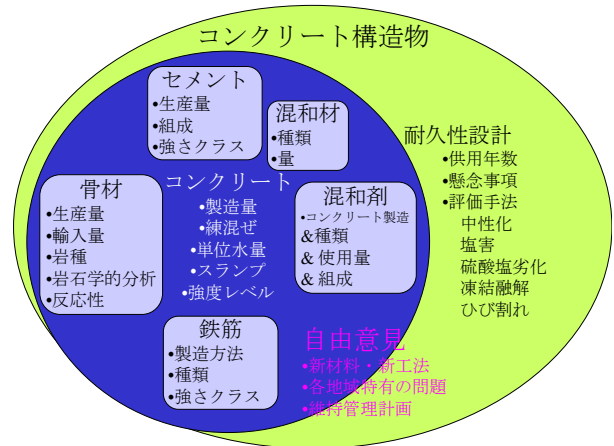


図-1 アンケート調査のコンセプト

例の作成のため、国内において数名にアンケートの回答を依頼するとともに、質問項目の良否について議論し、アンケートの改善を行った。

### 3. ConMat' 09 開催報告 (WG1)

ConMat'09 に関しては、「コンクリート工学」vol.47, No.11<sup>1)</sup>に既に掲載されているので、ここでは概略のみを説明する。詳細は上記文献を御参照いただきたい。

ConMat'09 は、2009年8月24日～26日の3日間、名古屋国際会議場にて開催された。25ヶ国より、319名の会議登録者、15名の国際学生研修生および10名の同伴者を含む計344名の参加があり、盛大な会議となった。会議には、一般講演論文209編、招待講演論文6編および基調講演論文6編の221編の論文が寄せられた。一般講演には、コンクリートを中心に、新材料、物性、構造設計、耐久性、環境影響評価、リサイクル等に関する幅広いテーマの論文が寄せられた。

### 4. アンケート調査結果報告 (WG2)

アンケートを送付した55ヶ国のうち、16ヶ国、29名より回答を頂いた。専門分野の違いにより、各項目で情報量の違いはあるものの、非常に興味深いデータが収集できた。また、各質問項目での自由意見は、各国の現状を反映した貴重な意見であり、国際的な相違点を相互理解する上で非常に有益となりうるものであった。ここでは、回答を整理し、要点をとりまとめた結果を示す。

#### 4.1 セメント

##### (1) セメント生産量の推移

セメント生産量の変化と組成の変化に関して、世界的な傾向と特徴について述べる。なお、2008年は世界的経済危機により傾向の把握には不適と考えられたことから、2008年より前の統計データを考察の対象とした。

図-2は1997年および2006年のセメント生産の内訳を示したものである。なお、この図はPCAの情報<sup>2)</sup>に基づき作成した。1997年では、上位4ヶ国(中国、インド、

## 2.2 アンケート調査について (WG2)

世界各国の主要な研究者の協力を得ながら、現実に各地域で使用されているコンクリート材料と規格の実際をアンケート調査によってとりまとめた。また、同時に各国における材料の問題点や注目されている新材料、新工法、品質評価技術等に関する自由意見を収集し、これらを総合し、これらからのコンクリート材料の方向性について提言を行った。

各国の材料規格よりも現実に使用されている材料を比較することに重点を置き、アンケートを作成した。アンケートの送付は、55ヶ国に送付した。表-2にアンケート送付国一覧を示す。

アンケートは、コンクリート材料および設計法を網羅できるように項目を設定した。図-1にアンケートのアウトラインを示す。各材料の項目は、セメント、骨材、混和材(剤)料および鉄筋とし、さらに、コンクリートの製造、施工に関する項目と耐久性設計に関する項目を加えた。各項目について、統計量や品質、規格等の細目を設定し、最終的には1つのExcelファイルにまとめ、配布した。表-3に質問項目の一覧を示す。また、アンケートの各質問項目について、各国における問題点や注目されている新材料、新工法、品質評価技術等に関する自由意見を募った。各材料について統計データが無い場合には、相対比較からの推定値もしくは無回答でも良いとし、できるだけ多くの回答が得られるようにした。また、回答

表-3 質問項目一覧

セメント	統計量	生産量 消費量	コンクリート	統計量	製造量
	製造プラント	プラント数 キルンタイプ		製造	練混ぜ方法 輸送 計量誤差
	価格 セメント種類 強さクラス 規格	上位4種と内訳		施工	打込み、締固め
				品質	単位水量 スランブ 強度レベル
				高品質コンクリート	自己充填コンクリート 高強度コンクリート
骨材	統計量	消費量	耐久性	価格	
	種類と内訳	砕石 天然骨材 再生骨材 副産物(スラグ骨材) その他		耐久性設計	
	品質規格	密度 吸水率 その他		設計供用年数	
	粒度調整			最重要検討項目	
	価格			劣化の認識と対策	中性化 塩害 乾燥収縮 温度応力ひび割れ ASR 化学的侵食 硫酸塩劣化 ソーマサイト硫酸塩劣化 下水道システム DEF 凍結融解
	岩石学的評価				
	アルカリ反応性試験				
混和材料	混和剤種類	減水剤 高性能AE減水剤 その他	鉄筋	統計量	製造量 消費量 輸出入量
	ベース	リグニンスルホン酸 ナフタレンスルホン酸 メラミン ポリカルボネート		製造方法	
	混和材	高炉スラグ微粉末 フライアッシュ 石灰石微粉末 シリカフェーム 膨張材 その他		種類	丸鋼 異形
				規格	
			腐食防止対策		

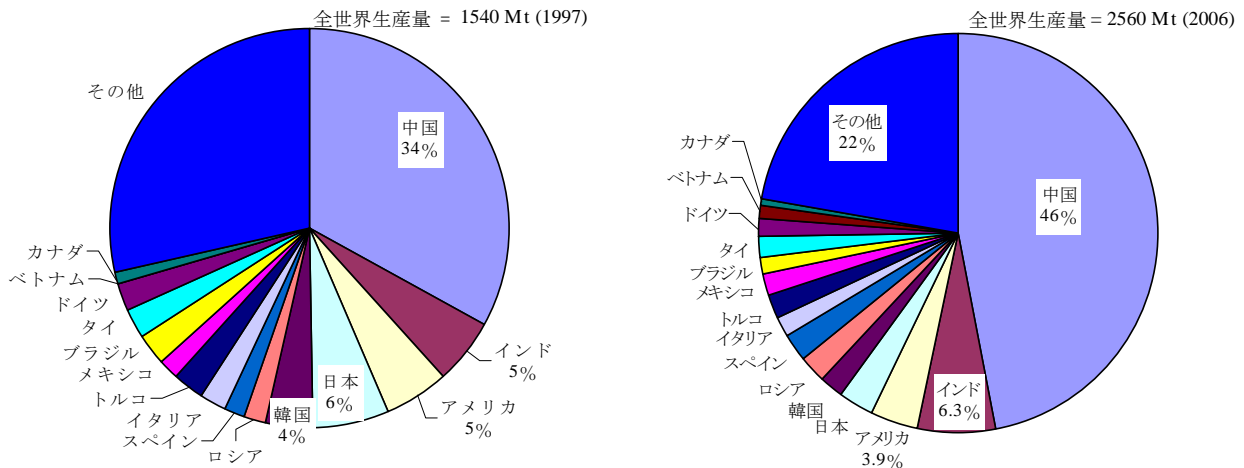


図-2 1997年と2006年のセメント生産量内訳(主にPCA report<sup>2)</sup>のデータより作成)

米国、日本)が世界全体の生産量の約50%を占め、さらに、上位20ヶ国で全体の約70%を占めている。この傾向は、10年後の2006年には、大きく変化している。2006年では、全生産量の半分近くを中国が占め、上位20ヶ国によって生産量の約80%に達することが分かる。

また、ほとんどの国は、1997年から2006年の10年間で、セメント生産量が増加している。表-1は、1997~2006年の間の年間セメント生産量を示している。また、表中の右に示す数値は、1997年および2001年の生産量に対する2006年の生産量の比率である。表より、特徴的な国として、ベトナムおよび日本が挙げられる。2001年~2006年の5年間で、ベトナムは最も生産量の伸び率が高い国であり、一方、日本はそれが最も低く、唯一、日

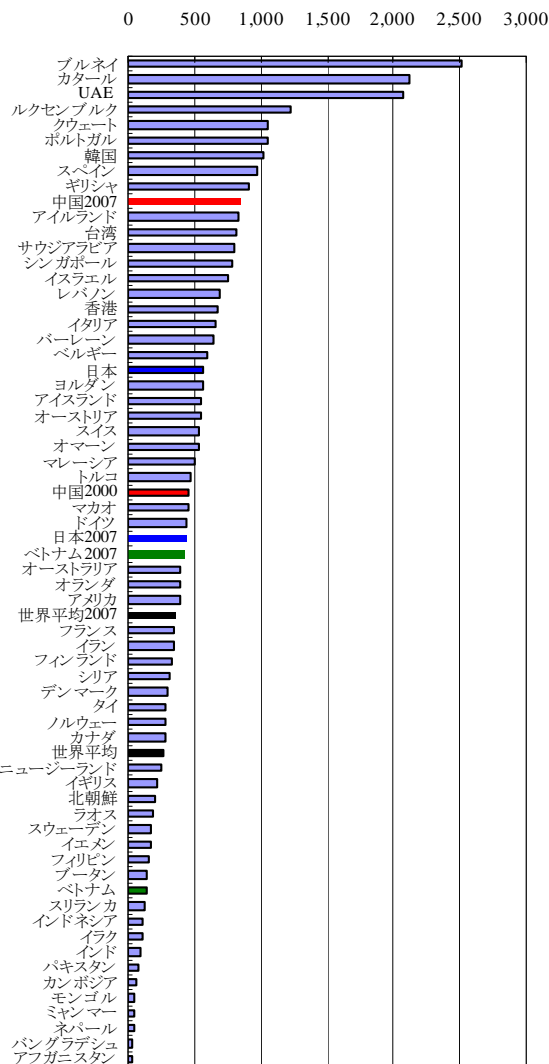
本のみが2006/2001の値が1未満、すなわち減少傾向にある国であった。

セメントの消費傾向について、大内らは興味深い分析結果を示している。2000年における一人当たりのセメント消費量を図-3に示す。なお、図中には、2007年のデータも幾つか含んでいる。図より、2000年の一人当たりのセメント消費量の世界平均は270kg/人であり、2007年には412kg/人に増加している。上位の国には特徴があり、産油国や経済が豊かな国、または経済成長が著しい国などが位置している。一方、発展途上国は、この数値が低い傾向にあり、代表的な先進国は、中位に位置していることが分かる。同時に、これらに国々では今後のセメント・コンクリートの需要増加が見込まれる。

表—4 セメント生産量の統計(主に文献2)の情報から作成)

	(単位: Mt/年)										2006/	2006/
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1997	2001
中国	511	536	573	597	661	725	862	970	1038	1204	2.36	1.82
インド	80	85	90	95	104	114	123	130	145	160	2.00	1.54
アメリカ	80.6	81.5	83	85	89	88	92	96	95.7	99.7	1.24	1.12
日本	92	81	80	81	77	72	69	67	69.6	69.9	0.76	0.91
韓国	60	46	48	51	52	56	59	54	51	55	0.92	1.06
ロシア	27	26	28	32	35	38	41	46	49	55	2.04	1.57
スペイン	28	28	36	38	41	42	45	47	50	54	1.93	1.32
イタリア	34	36	37	39	40	41	43	46	46	48	1.41	1.20
トルコ	36	38	34	36	30	33	35	39	43	47	1.31	1.57
メキシコ	28	28	29	32	32	33	34	35	36	40	1.43	1.25
ブラジル	38	40	40	39	39	38	34	34	37	40	1.05	1.03
タイ	37	22	25	25	28	32	33	36	38	39	1.05	1.39
ドイツ	36	37	36	34	32	31	33	32	30	34	0.94	1.06
ベトナム				14	16	20	23	27	29	32		2.00
カナダ	12	12	13	13	13	13	13	14	14	14	1.17	1.08
その他	440.4	443.5	448	439	451	474	491	517	578.7	568.4	1.29	1.26
世界全体	1540	1540	1600	1650	1740	1850	2030	2190	2350	2560	1.66	1.47

一人当たりのセメント消費量 (kg/人 2000年)



図—3 一人当たりのセメント消費量  
(主に参考文献3)より作成)

(2) セメントの種類

セメントの種類に関して 12 名よりアンケートの回答が得られた。主用なセメントがポルトランドセメントである国は、日本、韓国、台湾、米国、カナダ、シンガポ

ール、タイ、フィリピン、インドネシア、コスタリカ、スイス、イギリスなどで、混合セメントを主用なセメントとする国は、中国、ドイツ、中央ヨーロッパ、ベトナム、バングラデシュ、ケニヤなどがある。また、アンケート結果は得られなかったが、筆者らの情報ではフランス、イタリア、スペインなども、混合セメントが主である。後述する混和材料に関する情報と関連するが、ポルトランドセメントを主用とする国々でも、混和材料が使用されるケースが多いようである。しかし、我が国では、海外諸国に比べ混和材料の使用は活発ではなく、コンクリートの 80%がプレーン(混和材料無混和)コンクリートである。

また、セメントの種類に関して、欧州において特徴的な変化が見られる。図—4 は、VDZ 提供のデータ<sup>4)</sup>によるドイツにおけるセメントの種類の変遷およびセメントの強さクラスの変遷を示したものである。過去 10 年間に於いて、ポルトランドセメントの割合は低下傾向にあり、石灰石混合セメントの割合が増加している。これは、炭素税の導入によるものと考えられる。また、強さクラスに着目すると、42.5 クラスのセメントが増加していることが分かる。欧州では、従来、汎用の強度レベルのコンクリートには、低い強さクラスのセメントを用いる傾向にあり、高い強さクラスのセメントは、高強度コンクリートや早期強度を必要とするコンクリートに対する使用に限られていた。これは、施工性の良いコンクリートの製造には粉体量を一定範囲に制御することが必要であるが、汎用コンクリートでは低い強さのセメントで最低量が確保でき、高強度コンクリートで高い強さのセメントで過剰となることが防げるという背景による。

米国およびニュージーランドのセメント品質規格には、性能照査型のセメント品質規格があり、それぞれ、ASTM C 1157 および NZS 3122 がそれである。Roumain<sup>5)</sup>によると、ほとんどの州の建築基準法で ASTM C 1127 適合セメントの使用が認められている。また、土木分野

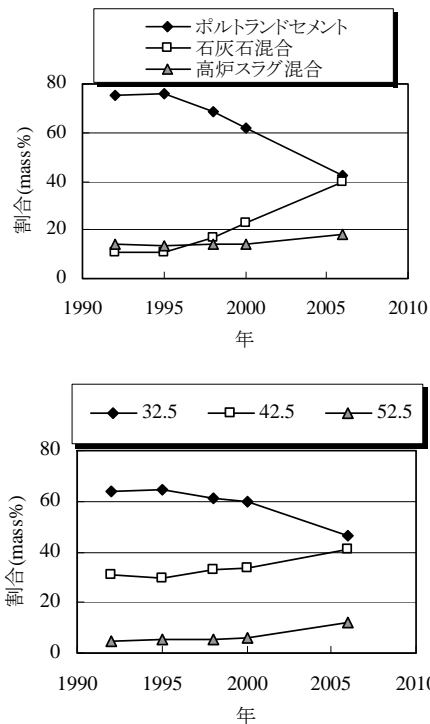


図-4 セメントの組成と強さクラスの変化(ドイツ) VDZ Annual Report<sup>4)</sup>より作成

でも幾つかの州で米国運輸省(DOT)の工事において認められている。現在、(社)日本コンクリート工学協会(JCI)において混和材料に関する研究委員会が立ち上げられ、性能照査型のセメント品質規格が検討されている。これらの規格は、セメントの組成に関する規定ではなく、用途に応じた性能を満足することを求める。セメントの組成の自由度が増すことは、セメント原料に対する副産物利用の活発化が見込まれ、セメント産業におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく寄与することが予想される。また、3成分系セメントなどの利用も容易になることが期待される。

### (3) 廃棄物利用

全世界的にセメント産業は、廃棄物利用において重要な役割を担っている。ここでは、特徴的な点を挙げる。

- 欧州の多くの国で、燃料の約半数が、肉骨粉、都市ごみ、バイオマス等の代替燃料である。一方、米国、日本では代替燃料の利用は少ない(米国では10%程度)。
- 日本の特徴的な点は、副産物のセメント原料としての利用が多いことである。2007年では、1トンのセメントの製造に際し、486kgの廃棄物が利用されている。
- セメント製造における環境負荷においてエネルギー効率は重要な要素の一つである。図-5<sup>5)</sup>は1トンのセメントを製造する際のエネルギー消費量について、日本を100として国別で相対的に比較したものである。なお、図は2003年のデータを元に作成しており、日本でのエネルギー消費量は3.44GJ/t-cementである。図より、我が国のセメント製造技術は、非常にエネルギー

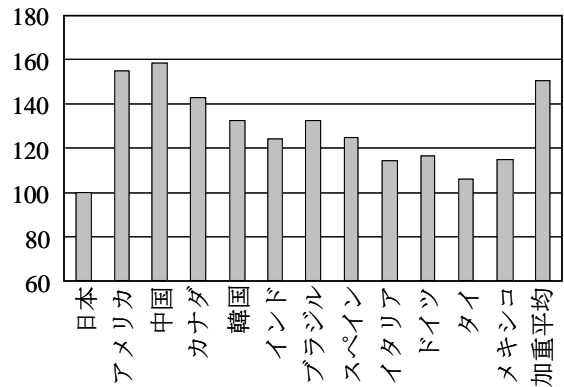


図-5 エネルギー消費量の相対比較(2003年)<sup>5)</sup> 日本=100 (3.44GJ/t-セメント)

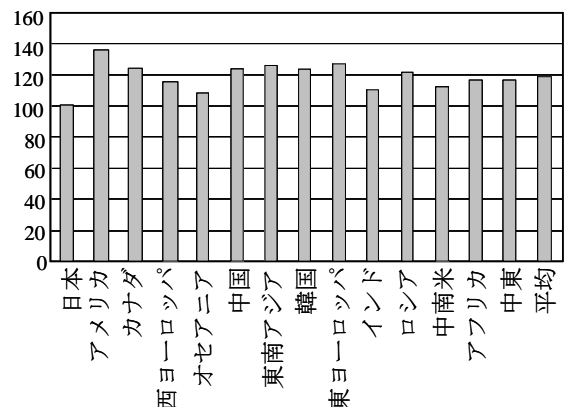


図-6 CO<sub>2</sub>排出量の相対比較(2000年)<sup>6)</sup> 日本=100 (0.732t/t-セメント)

効率が良いことが分かる。また、図-6<sup>6)</sup>はセメントを1トン製造する際のCO<sub>2</sub>排出量について図-5と同様に日本を100として比較したものである。なお、図-6中のデータは2000年のもので、日本は0.732t/t-cementである。図より、CO<sub>2</sub>排出量では、エネルギー消費(図-5)に比べ国別の違いは小さい。セメント製造において、CO<sub>2</sub>排出の大半は石灰石の脱炭酸化によるものであり、この過程でのCO<sub>2</sub>排出には大きな差はないものと考えられ、CO<sub>2</sub>排出量の違いは焼成エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量によるものと考えられる。

### (4) 規格

米国およびカナダの規格では、環境負荷低減を目的とし、混和材料のポルトランドセメントに対する置換率を増加させる方針にある。米国PCAのSteve Kosmatka氏によると、ポルトランドセメント規格ASTM C 150において、2004年に最大でセメントの5%を石灰石で置換することが認められるようになった。さらに、2009年の改訂により、process addition(クリンカ粉碎時に添加が認められている添加剤)として最大で5%を鉱物質添加剤で置換すること、および最大で1%を有機質で置換できることを認めている。以上のことから、セメントの5%をセッコウにより置換した場合を含めて考えると、石灰石置換の5%とprocess additionの鉱物質物質5%および有機質物

質 1%を加えると、セメント中のクリンカ量は理論的には 84%にすることができるということになる。

また、カナダ トロント大学 Doug Hooton 教授からの情報では、2008年にカナダセメント規格(CSA A 3001)は新たなクラスとして、石灰石セメント(Portland- Limestone Cements, PLC)を導入した。PLCは、セメントの最大 15%を石灰石微粉末により置換したものである。PLCは、ソーサイト硫酸塩劣化の危険性の増加が懸念されることから、硫酸塩が作用する環境での使用は禁止されている。また、PLCはフライアッシュやスラグなどと混合した場合にも、十分に性能を発揮できる。2009年には、PLCは、カナダコンクリート規格 CSA A23.1において利用可能なセメントとして含まれ、さらに2010年には建築基準法においても適用される予定である。このような傾向は米国でも見られ、ASTM C 1157の品質規定型のセメントとして PLC 同様のセメントの製造が開発されている。

また、以上のような新たなセメントのトレンドに対応し、セメント会社や大学では、特に硫酸塩劣化に関する研究が近年盛んに行われているようである。

#### 4.2 骨材の地域性

アンケート中の骨材に関する箇所については、6名の方(日本、シンガポール、タイ、バングラデシュ、カナダ、オランダ)より回答を頂いた。骨材種類は地質、地理条件により大きく異なり、国によって骨材事情は様々である。以下に各国の特徴を示す。

- 日本: 海砂採取は規制される傾向にある。主に砂岩骨材による収縮問題が最近認識されるようになった。
- タイ: 大半の粗骨材が石灰石砕石である。細骨材は川砂。
- バングラデシュ: 粗骨材は砂岩。細骨材は細かい川砂主体で、高品質コンクリートではより粗い川砂と混合する。
- シンガポール: 骨材はすべて輸入している。
- カナダ、北米大陸の北西部: Natural glacier gravelの骨材としての利用が多い。
- オランダ: 河川砂利、河川砂の利用が多い。近年、ライン川、Maas川の保護のため海砂の利用に移行傾向にある。

#### 4.3 混和材料

BASFグループの協力もあり、15ヶ国の混和材料および化学混和剤に関するデータを得ることができた。アンケート結果の整理にあたり、まずは、コンクリートの製造方法により分類した。すなわち、レディーミクストコンクリート(RMC)、プレキャストコンクリート(PCa)および現場練りコンクリートの3つに分類を行った。図-7に各国のコンクリートの製造方法の内訳を示す。さらに、RMC およびプレキャストコンクリートで使用される化学混和剤の種類(AE減水剤(WR)または高性能AE減水剤(SP))の内訳を調べた(図-8)。また、各混和剤に関して、リグニンスルホン酸系(Lig)、ナフタレンスルホン酸系

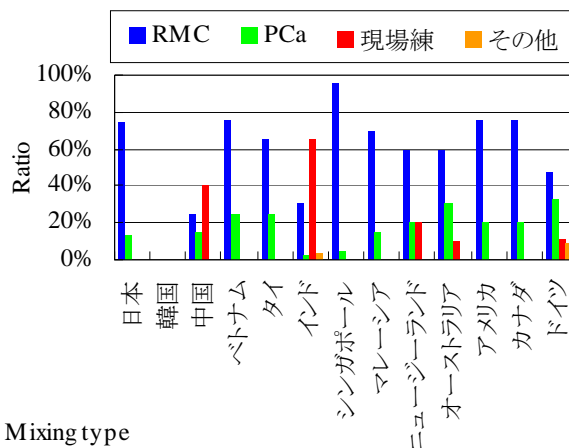


図-7 コンクリート製造方法

(BNS)、メラミンスルホン酸系(MM)およびポリカルボン酸系(PC)の割合を求めた。さらに、混和材料についても整理を行った。

#### (1) コンクリートの製造方法での比較

先進国と発展途上国で、傾向が異なる。先進国では、ほとんどが、RMCであり、プレキャストコンクリートもいくらか見られる。一方、発展途上国においては、現場練りコンクリートの占める割合が大きいことが分かる。なお、この図は原データをまとめたものだが、ベトナムとタイのデータの解釈には若干注意が必要である。図中ではベトナムでは現場練りコンクリートが 0%となっているが、これは RMC での混和剤の割合であろう。Nghi Son Cementの Atsushi Matsui氏によると、数値を示すのは難しいが多くのコンクリートが現場練りによって製造されているとのことである。タイでは 60%が RMCである。バングラデシュでは 20%のみが RMCである。

現場練りのもうひとつの特徴は体積計量ということで、混和材料は使用されず、水はワーカビリティが必要な分量を添加することになる。

#### (2) 化学混和剤

図-8より、中国、インドでは、RMCにおいても高性能 AE減水剤の利用率が非常に高いことが分かる。また、RMCのSPの主成分に着目すると、ベトナム、タイ、インド、シンガポール、マレーシアなどの暖かい気候の地域では、ナフタレンスルホン酸系のSPが主に使用されていることが分かる。これは、BNSが高温環境でも高い性能を維持することや比較的安価であることによるものと考えられる。

#### (3) 混和材料

日本、韓国、ベトナム、バングラデシュでは、混和材料の使用は比較的少なく、一方、タイ、米国、カナダ、ドイツ、オーストラリアでは、積極的にフライアッシュ、スラグがRMCプラントにおいて使用されている。また、プレキャストコンクリートに対し、膨張材を使用するケ



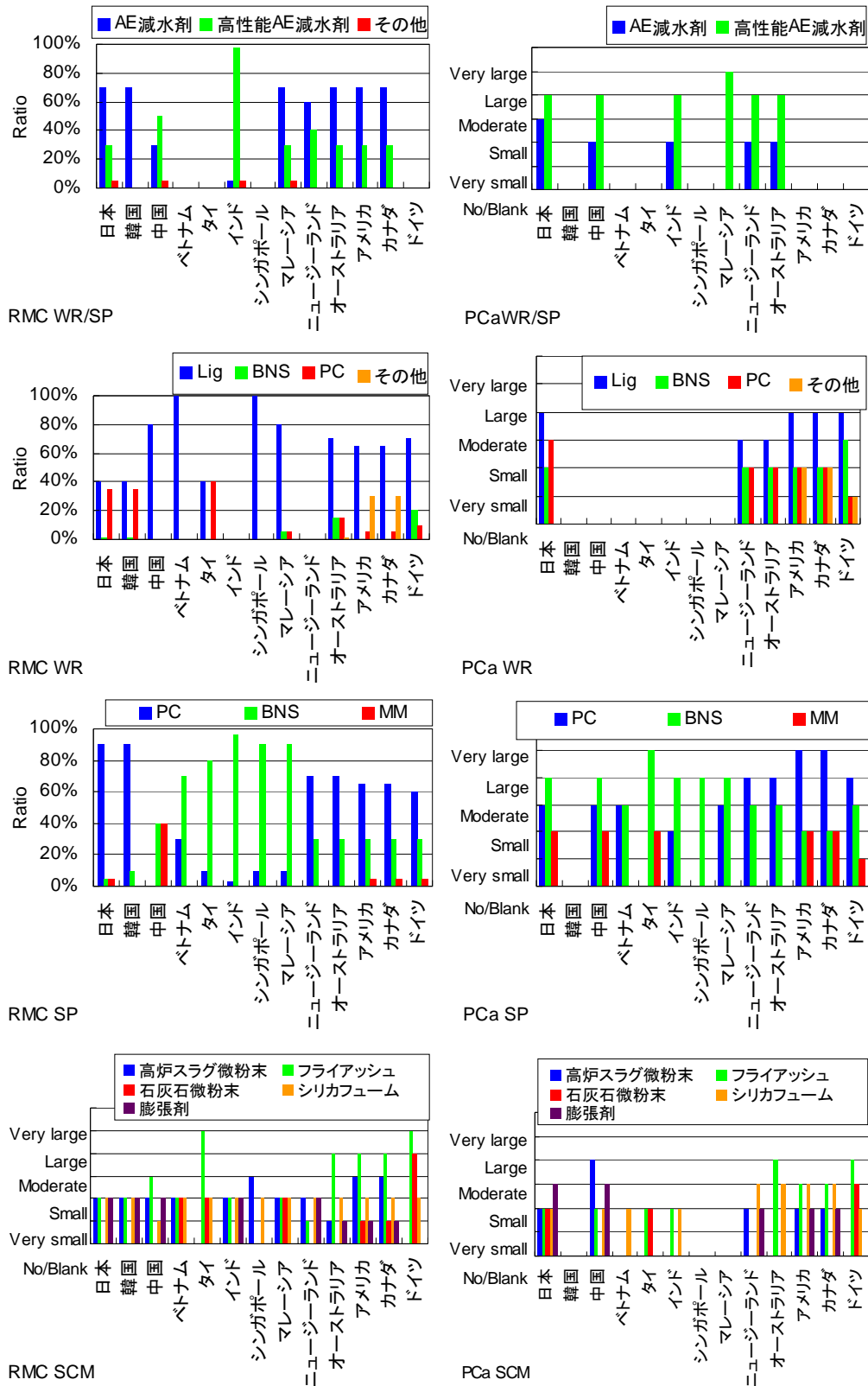


図-8 各国の混和材料の利用状況

ースが多いが、これは、乾燥収縮抑制を目的として用いられていることが多かった。

#### 4.4 コンクリート製造

**単位水量:** 単位水量の上限値を設けている国は、日本、

韓国、コスタリカのみであり、欧米諸国やタイ、バング  
ラデシュでは、単位水量に関する規定は無いようである。  
以下もそうであるが、東南アジア各国やアフリカなどは  
旧宗主国の規格をベースに各国規格が展開しているので、

多くの発展途上国は元の規格と同じ性格を持っている。

**塩化物イオン量の規制:** 塩化物イオン量の規制において、まず、その表記方法の違いがある。つまり、セメント従量表記と総量表記の違いである。理論的には、鋼材腐食は、セメント中の塩化物イオン濃度によって決定されることから、表記法としては、前者のセメント従量表記が適していると考えられる。しかし、日本ではコンクリート製造における人為的影響を考慮し後者の総量表記を採用しているという意見もあり、オセアニアと韓国など限られた国では総量表記を採用している。なお、韓国では総量表記から従量表記へ一部移行しつつある。

タイやバングラデシュなど、規制導入の必要性は認めながらも、いまだ規制に至らない国々も多いようである。規制導入に当たっては ASTM や EN 規格を主に使用していることもあるが、従量表記の規制が合理的とする意見もある。

**ASR:** 日本も含め、依然として骨材の反応性を、化学法、モルタルバー法によって判定している国が幾つか見られた。近年指摘されているようにこれらの試験方法では、遅延膨張性骨材やペシマムの影響のある骨材では適切な判定ができないことを理解しておく必要がある。ASTM が浸透しているタイでは、ASTM C1260 での評価を実施している。ASR の課題は、リスクに対する認識が国ごとに相当に異なること(日本でもペシマム現象と隠微晶質石英による遅延性膨張への理解は遅れている)、対策を講じたくともスイスなどのように非反応性能岩石もフライアッシュなどのボゾランも入手が困難な場合があるということである。

**硫酸塩劣化:** 明らかに問題視されているのは、中東、米国、カナダ、欧州などであり、潜在的には多くの国で意識されている。混合セメントやフライアッシュなどのボゾランが入手可能な場合も多く、エトリンサイト生成による劣化対策は容易な場合も多い。ただし、中東で問題となるような地下水の地表付近での蒸発による土壌からの立ち上がり部での物理的硫酸塩劣化に関しては、ACI であってもいまだ認識も不十分で対策も完全とはいえない状況である。

#### 4.5 耐久性設計

性能照査型設計法は最新のトレンドであり、学術的な関心が高いトピックスである。しかし、実務への適用については、まだ幾つもの課題が残されているようである。オランダでも仕様規定型の設計法から性能照査型設計法への移行が検討されている。回国運輸省 Joost Guiliker 博士によると、供用年数が 100 年のコンクリート配合を提案できるが、それが妥当であることを保証する術がないのが現状であり、現状では、判断基準、評価方法、実証データなどが未確立であることが問題点であるとしてい

る。例えば RC 構造物で最も問題となる塩害に関しても、実験室のデータからは、コンクリートの材料、配合条件に関連し、CI の拡散係数が得られ、将来の予測が可能である。しかし、実際の構造物のかぶりコンクリートが有する品質の保証は現状の技術では、困難である。

#### 4.6 鉄筋

日本、オランダ、韓国、バングラデシュ、コスタリカの 4 名よりアンケートの回答を頂いた。すべての国において、鉄筋は、電気炉で製造されていた。また、オランダは、唯一、冷間加工を採用している国であった。バングラデシュでは、廃船を購入してきて鋼材を再生している。ここでは労働環境が問題視されている。

### 5. コンクリート材料の方向性

#### 5.1 セメント産業

G8 サミットでは、全世界での CO<sub>2</sub> 排出量を 2050 年までに現在の 1/2 とすることが目標として掲げられた。セメント産業における CO<sub>2</sub> 排出に関して、Herfort<sup>7)</sup>によると、2006 年時点では、全世界での年間のセメント生産量 2.5G トンに対し、80%にあたる 2G トンの CO<sub>2</sub> が排出されていると推定されている。また、セメントの生産量は増加することが予測されている。現在と同じ製造システムでは、CO<sub>2</sub> 排出量も 2050 年には現在の倍の 4G トンが排出される計算になる。したがって、2050 年の CO<sub>2</sub> 排出量の目標達成には、3G トンの CO<sub>2</sub> 排出量を削減できる技術革新が必要であると言える。

**生産効率の向上と代替燃料の利用:** 第 1 に、最新のセメント製造システムの適用が必要である。その上で、CO<sub>2</sub> 削減に貢献できるものとして、廃油やバイオマスなどの代替燃料の使用が挙げられる。以上の方法の適用によって、0.93G トンの CO<sub>2</sub> 削減が可能と推測される。

**混和材料の使用:** 第 2 の手段として、混和材料の利用促進がある。一般的なものとして、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの利用が挙げられるが、これらは、生産量や流通の問題から、利用拡大には限界がある。そこで、別の方法として、石灰石微粉末の利用拡大が考えられる。活性のアルミナと共に石灰石微粉末を用いることで、強度レベルを維持することが可能である<sup>8)</sup>。以上の方法によって、0.88G トンの CO<sub>2</sub> 削減が見込まれる。

**コンクリートの炭酸化による CO<sub>2</sub> 吸収:** 劣化現象の一つであるコンクリートの炭酸化も、見方を変えれば CO<sub>2</sub> 削減に貢献していると言え、実際に 0.34G トン程度の CO<sub>2</sub> 削減効果が推定されている。

以上に挙げた方法によって削減可能な CO<sub>2</sub> 排出量は、2.13G トンであり、目標の 3G トンに対し、0.83G トンが残っている。この対策の一つとして、ジオポリマーのような低 CaO 含有の材料を結合材として用いることや焼



成温度を低下させ、セメントの間隙相の組成を変化させることができれば<sup>9)</sup>、CO<sub>2</sub> 排出削減に大いに貢献できるものと考えられる。

## 5.2 新技術

### (1) 新材料—米国のケース

**High Volume Fly Ash (HVFA) Concrete:** HVFA コンクリートは、セメントの50%以上をフライアッシュで置換したコンクリートであり、CO<sub>2</sub> 削減、水和熱抑制、ASR 抑制および硫酸塩劣化の抑制効果が高いコンクリートとして注目されている。また、Malhotra and Mehta によるテキスト“High performance High-Volume Fly Ash Concrete”も発刊されている。

**砕石粉:** 骨材製造時に副産される砕石粉(粒径 75 μm 以下)の利用促進がなされている。細骨材に対し 20%を置換した場合でも、適切な混和剤使用によって、十分な施工性能を有し、さらに高い物質透過抵抗性および曲げ強度が得られる。

**透水性コンクリート(permeable concrete):** 我が国では、ポーラスコンクリートと呼ばれるものであるが、近年米国では、道路や駐車場の透水性舗装にポーラスコンクリートが用いられている。

### (2) 新工法

**超高強度コンクリート:** 超高層建造物等に対し、200~250MPa を超える超高強度コンクリートの適用が増加している。例えば、韓国では、超高層ビルの基礎への適用事例がある。また、高い靱性を有する繊維補強超高強度コンクリート(Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete, UFC)も、ピクプロジェクト等で実用化され始めている。最近では、我が国の羽田空港拡張工事において、滑走路部に UFC が適用されている。

**自己充填コンクリート(SCC):** SCC は、欧州では、既に一般的なものとなっており、多くの国で利用が拡大している。また、SCC においては、レオロジー管理が重要であることから、近年、米国では携帯型のレオメーターが開発されている。

### (3) 各国における現在の材料に関する問題点

**乾燥収縮:** 乾燥収縮を問題とする国は多く、我が国も含め、タイやコスタリカが自由意見として乾燥収縮問題を取り上げていた。特に、砂岩骨材で、大きい乾燥収縮ひずみが生じるケースが多く見受けられた。近年、我が国でも、乾燥収縮による劣化事例が数多く報告され、また、コスタリカでも、乾燥収縮が原因と考えられるコンクリートの変状が認められている。

**ASR:** 日本では、ASR による鉄筋破断の事例が数多く報告され、ASR 抑制は急務となっている。

韓国、タイなどでも ASR に対する関心を持たれはじめているが、骨材の岩石学的評価を行える人材に限られて

いるのが現状の問題点である。

**DEF:** Texas Austin 大学の D. Fowler 教授によると、現在米国では、遅延型エトリングタイトの生成(Delayed Ettringite Formation, DEF)による膨張劣化が深刻な問題となっている。DEF は、高温蒸気養生が原因で生じるとされており、養生温度の上限を低くする等の対策が考案されている。

### (4) 建設システムの改善

コンクリート材料や施工法の選定において、環境負荷も重要な評価項目となってきており、各材料や工法の定量的な環境影響評価手法が求められている。

このような先進的なトピックスが注目されている一方で、耐久的なコンクリートの製造に関して基礎的課題も残されている。我が国においても、かぶり確保や骨材粒度の均一化など不十分な点はいくつもあることが指摘されており、発展途上国においては、より多くの課題があることが想像される。建設システムに関する総合的な教育と改善が必要である。

### (5) 維持管理方針

**品質評価と余寿命推定:** 品質評価や余寿命の推定は、柱や梁といった部材レベルにおいても難しく、建築物、橋梁といった構造物全体の評価には、解決すべき課題が山積している。この課題に関して、近年、我が国では、土木学会 331 委員会(委員長:長岡技術大学下村匠教授)が起ち上げられ、鋼材腐食の定量評価や確率的手法による品質推定、劣化構造物の数値解析、非破壊試験による品質評価手法の確立などについて、議論がなされてきた。

**モニタリング:** 日本では実構造物のひずみ等の物性値のモニタリングツールとして、RFID(Radio Frequency Identification technology)が利用されている<sup>10)</sup>。RFID は、コンクリート中に埋設した状態で使用でき、鉄筋等に貼付したひずみゲージと RFID タグを接続することで、RFID にデータが蓄積される。蓄積されたデータは、コンクリート外部からレーダーにより読み取りが可能である。このような技術は材料の充填センサー、腐食センサーなどさまざまな展開が期待される。

David Fowler 教授によると、米国では、現在ヘルスマニタリングに関する研究が盛んであり、鋼材腐食、変形、ひび割れ等の変状をリモートセンシングによって把握できるシステムの開発が行われており、また、PCA では、ここ数年において、橋梁のオンラインモニタリングが試験的に行われている。

**補修:** 補修材料の開発は、依然として重要な課題である。また、補修材の耐久性予測や補修構造物の余寿命評価なども発展が望まれる。今回の調査では残念ながら具体的な情報を得ることは難しかった。

## 6. 実情調査

アンケートを行うと同時に、現実の姿を知ることを目的に個別に実情調査を行った。調査対象地域としては日本に比較的近い東南アジアから、先進的であるタイ(バンコク)と今後の発展が期待されるバングラデシュ(ダッカ)を選んだ。

バンコクでは Thammasat 大学の Somnuk Tangtermsirikul 教授の紹介で Boonrawd Kuptitanhi 氏 (The Concrete Products and Aggregate Co.Ltd., サイアムセメントグループ)に、ダッカでは Bangladesh Univ of Eng. & Tech. (BUET)の M. A. Ansary 教授の紹介でコンクリートが専門の M. A. Noor 教授および ABC Pbuilding Products Ltd.社に協力していただいた。

両国とも、少なくとも一部は、全自動計量の強制 2 軸ミキサを装備した生コンプラントがあり、90 分の生コン輸送、コンクリートポンプと内部振動機による施工が行われており、日本と大きく異なることはない。バンコクでは GPS 付き生コン車が効率的に活用されている。

40℃近い高温が続くので常に暑中コンクリートである。強度試験体は屋外の水槽で所定材齢まで養生され、温度制御はしていない。高強度コンクリートのレベルは日本に比べるとかなり低い。また両国に共通していることは大規模プロジェクトが計画されており、予算さえあればすぐにも実行したいという体制にあることである。

両国、もしくは先進国との違いは、先端工場の割合である。海外企業が入る国際プロジェクトは別であるが、平均的には、現場練が多い。バンコクでは生コン 4 割、ダッカでは同 2 割程度である。特にダッカでは、ほとんどが現場でのバケツによる体積計量で、水量は所定スランプになるように適宜添加される。タイでは生コンには普通ポルトランドセメント、フライアッシュ、高炉セメントの 3 種類が供給できる場合が過半数である。バングラデシュは、主流が EN 規格による CEM II42.5 でフライアッシュセメントが主体である。

タイの悩みは政権の安定性である。予算はあっても執行できない。かぶりの制御が問題なのは日本と同じ。

バングラデシュは、セメント会社 52 社(クリンカ工場は二つのみで残りは粉碎工場)がひしめき、1 億 4 千万人が 2200 万トン消費している。これからセメント・コンクリートは利益率の高い経済活動期を迎えるであろう。問題は、平均的技術レベルを上げる余裕がないため、不良資産が急激に製造されているという現実である。ガンジス川の大規模デルタを持ち、汎用的には砂岩もしくは粉碎レンガを粗骨材とし、デルタからの細かい砂(F.M.=1.1)を使っている。経済事情を反映して高層建築を除く通常の建築物においては、支保工が竹であることも特徴的であり、これはベトナムも共通である。

## 7. まとめ

コンクリート用材料は、世界各所の地域性を反映し、多様である。国際的な相違点について相互理解を促し、情報を共有することを目的とし、世界各国にアンケートを配布し、使用されている材料等の実際を回答いただくこととした。16ヶ国、29名より回答と自由意見として各地域における貴重な意見を得ることができた。本調査をもとに、得られた知見を以下に示す。

- 1) セメント: セメント製造量は世界的に増加傾向にあり、セメントの組成は、近年変化しつつあることを述べた。また、廃棄物利用においてセメント産業が果たすべき役割は大きいことを述べた。
- 2) 骨材: 国内における乾燥収縮、ASR の問題を取り上げ、コンクリート製造に関しても解決すべき課題があることを述べた。骨材の種類は、各国がおかれている地質状況に左右され、多種多様なものであった。
- 3) 混和材(剤)料: 多くのデータより、各国の使用材料の現状の把握ができた。特に、ポゾランなどの混和材料は、地域によって使用状況がまったく異なっていることを示した。
- 4) 将来への展望: CO<sub>2</sub> 排出削減に向けた方策について提案を行った。2050 年までに排出目標を達成するには、各方面からの様々なアプローチが必要であることを述べた。また、世界各国での、新材料、新工法、モニタリングシステムについて紹介し、各地域での問題として乾燥収縮、ASR、DEF を取り上げた。

## 謝辞

今回のアンケート調査において、アンケートの回答とともに、多くの貴重なコメントを頂きました。紙面の制約上すべての情報を掲載することはできませんでしたが、各国の現状を知る上で大変貴重な情報を御提供頂きました。関係者各位に厚く御礼申し上げます。

**日本:** 安齋浩幸氏((社)セメント協会), 吉兼亨博士(大有建設(株)), 太田晃博士(BASF ポゾリス), 丸山一平教授(名古屋大学), 閑田徹志博士(鹿島建設(株)), 松岡和巳博士(新日本製鐵(株)), 吉田夏樹氏(日本建築総合試験所), **韓国:** Prof. Ha-Won Song (Yonsei Univ.), **中国:** Ms. Jianying Yang (BASF), **ベトナム:** Mr. Atsushi Matsui (Nghi Son Cement), Mr. Khos Vo (BASF), **タイ:** Prof. Somnuk Tangtermsirikul (Thammasat Univ.), Mr. Suchart Phussadisophon (BASF), **インド:** Mr. Anil Bendale (BASF), **シンガポール:** Mr. Kiat Huat Seow (BASF), Dr. Kiang Hwee Tan (National Univ of Singapore), **マレーシア:** Mr. Rosli Idris (BASF), **ニュージーランド&オーストラリア:** Ken Fletcher (BASF), **米国:** Mr. Kenneth Kruse (BASF), Mr. Brad Violetta(BASF), Mr. Steve Kosmatka (Portland Cement Association), Prof. David

W. Fowler (Univ of Texas Austin), カナダ: Prof. Doug Hooton (Univ of Toronto), Mr. Kenneth Kruse (BASF), Mr. Brad Violetta (BASF), ドイツ: Dr. Gerhard Albrecht (BASF), Dr. Patrick Schäffel (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)), オランダ: Joost Gulikers (Ministry of Transport), スロバキア: Dr. Pavel Martauz (Povask Cementare), コスタリカ: Mr. Oldemar Brenes

#### 参考文献

- 1) 魚本健人, 信田佳延, 綾野克紀: 第4回建設材料に関する国際会議(ConMat 09), コンクリート工学, Vol. 47, No. 11, pp. 72-74, 2009
- 2) Sullivan, E. J. *et al.*: North American Cement Industry Annual Yearbook, PCA, 2008
- 3) Ouchi, M.: Affairs of Concrete and Construction in Japan by Estimating from the Statistics on Cement Consumption, Concrete Journal, Vol. 42, No. 3, pp.13-19, 2003
- 4) VDZ: Activity Report 2005-2007, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Dusseldorf, 2008.
- 5) Roumain, J.C.: Sustainable Attributes of Concrete through Performance Specification, <http://webpages.mcgill.ca/staff/Group3/aboyd1/web/Conferences/AMW%20VIII/Roumain.pdf>, Anna Maria Workshop, 2007.

- 6) <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1f.html>
- 7) Herfort, D.: Developments Needed in the Production and Use of Cement for Large Reductions in CO<sub>2</sub> Emissions by 2050, <http://webpages.mcgill.ca/staff/Group3/aboyd1/web/Conferences/AMW%20IX/Herfort.pdf>, Anna Maria Workshop IX, 2008.
- 8) Yamada, K.: Conceptual Cement for Environmental and Durability Requirements, <http://webpages.mcgill.ca/staff/Group3/aboyd1/web/Conferences/AMW%20IX/Yamada.pdf>, Anna Maria Workshop IX, 2008.
- 9) Gartner, E.: Alternative Binders for Concrete with Reduced CO<sub>2</sub> Emissions, <http://webpages.mcgill.ca/staff/Group3/aboyd1/web/Conferences/AMW%20IX/Gartner.pdf>, Anna Maria Workshop IX, 2008
- 10) 小川彰一, 佐藤達三: センサ機能付 IC タグの構造物維持管理への適用, セメント・コンクリート, pp.28-32, No.725, 2007

